

## FOTOSYNTÉZA

Je základným metabolickým dejom, ktorý prebieha v rastlinách. Princípom fotosyntézy je premena slnečnej energie na energiu chemických väzieb, podmienená prítomnosťou fotosynteticky aktívnych pigmentov (najmä farbivá chlorofyl a, chlorofyl b a karotenoidy ako pomocné fotosyntetické farbivá).

Fotosyntéza je:

**súbor biochemických reakcií, prebiehajúci v zelených častiach rastliny, pri ktorom sa za účasti svetla a chlorofylu menia jednoduché anorganické látky ( $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ ) na sacharidy (syntéza sacharidov) a kyslík.**

Zjednodušený zápis reakcie:



resp.



Fotosyntéza prebieha v tých častiach rastlín, ktoré obsahujú fotosynteticky aktívne pigmenty. Medzi najdôležitejšie farbivá patrí **chlorofyl a**, jeho doplnkom sú ostatné chlorofyly (b, c, d), **karotenoidy** (oranžový  $\beta$ -karotén a xantofyly). **Fykobilíny** sú farbivá siníc (fykocyanín) a rias (fykoerytrín).

Pigmenty fungujú ako zberače fotónov - zachytávajú fotóny rôznej vlnovej dĺžky a energiu prenášajú na chlorofyl a.

Fotosyntéza prebieha vo dvoch za sebou nasledujúcich fázach:

1. **Svetlá - fotochemická fáza**, primárne deje fotosyntézy
2. **Tmavá - syntetická fáza**, sekundárne deje fotosyntézy

### Svetlá (fotochemická; primárna) fáza

Táto fáza prebieha len na svetle v chloroplastoch. Hlavnú úlohu zohrávajú komplexy pigmentov (farbív) - **fotosystémy**, ktoré sa od seba líšia zložením farbív:

1. **Fotosystém I (P700)** obsahuje chlorofyl, ktorý je schopný absorbovať svetlo vlnovej dĺžky do 700 nm a prejsť tak do excitovaného stavu. Excitovaný fotosystém je schopný ľahko uvoľniť elektrón.

2. **Fotosystém II** (P680) obsahuje krátkovlnnější chlorofyly, absorbuje světlo s vlnovou délkou 680 nm.

Oba fotosystémy zachytávají světlo a energii posouvají do dalších reakcí.

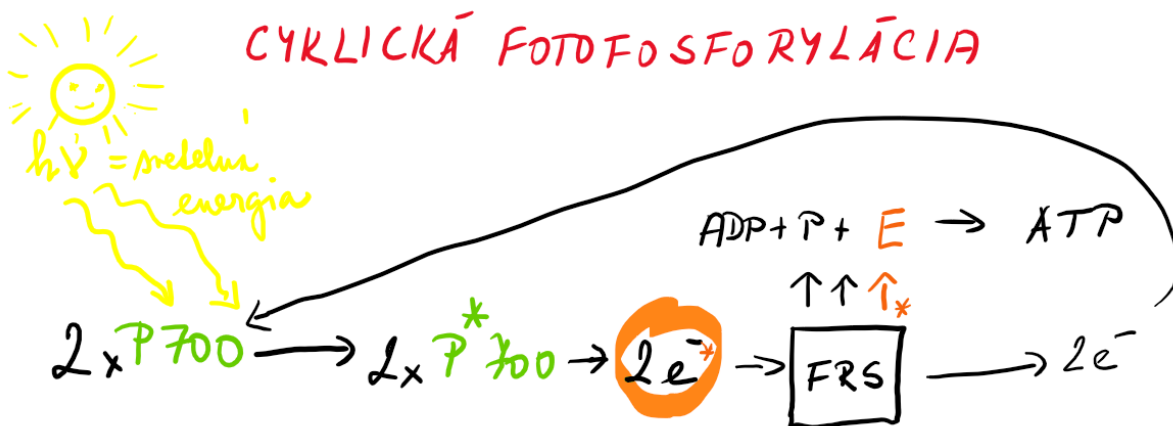
Pri popise dejov svetelnej fázy sa vychádza z modelu dvojelektrónového prenosu a preto budeme uvažovať o **excitácii dvoch elektrónov v dvoch molekulách P700** pomocou dvoch svetelných kvánt. Základom tejto fázy je absorpcia svetla fotosystémom I (P700).

Svetlo (2 svetelné kvantá) dopadajúce na systémy P700 spôsobí, že sa dva elektróny dostávajú do excitovaného stavu, t.j. na vyššiu energetickú hladinu. Takýto elektrón je prenesený na **Feredoxín redoxný systém (FRS)**.

FRS posúva elektróny do:

### 1 ) Cyklickej fotofosforylácie:

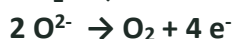
Energia elektrónov sa využíva na fosforyláciu ADP a ukladá sa do makroergickej väzby **ATP**. Elektróny, ktoré takto odovzdali energiu, klesajú na svoju pôvodnú energetickú úroveň a vracajú sa späť do systému P700, kde môžu byť opätovne použité. obr.1:



### 2 ) Necyklickej fotofosforylácie:

Energia excitovaných elektrónov sa presúva na akceptor, ktorým je **NADP<sup>+</sup>** (Nikotínamidadenínindinukleotidfosfát). K jeho ďalšej redukcii sú potrebné okrem 2 elektrónov aj dva protóny vodíka (H<sup>+</sup>), ktoré sa získajú z rozkladu vody pomocou svetla - **fotolýzy vody**. Energia elektrónov je využitá k fotofosforylácii a vzniku ATP. **Elektróny sa nevracajú do systému P700. Chýbajúce elektróny sú doplnené zo systému P680, ktorý si ich potom berie z fotolýzy vody:**

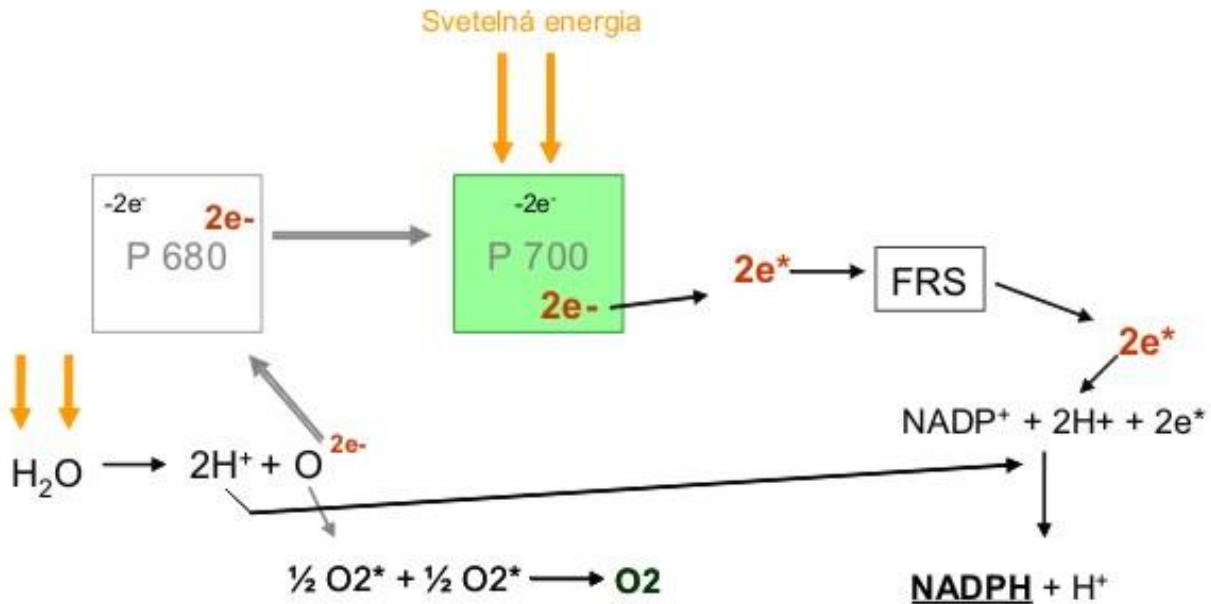
Pri fotolýze sa voda rozkladá:



Dva elektróny kyslíka sú vrátené systému P680 a 2H<sup>+</sup> sú využité na redukciiu NADP<sup>+</sup>.

Atóm kyslíka sa spája s iným atómom a vytvára molekulu  $O_2$ , ktorá sa uvoľňuje do prostredia alebo sa využíva na dýchanie (respiráciu).

obr. 2:



**Výsledkom svetlej fázy** fotosyntézy je teda zachytenie svetelnej energie a jej premena na energiu chemickej väzby **ATP** a vytvorenie **NADPH + H<sup>+</sup>**, ktoré sa využívajú v tmavej fáze. Vedľajším produktom je molekula kyslíka.

### Tmavá (syntetická; sekundárna) fáza

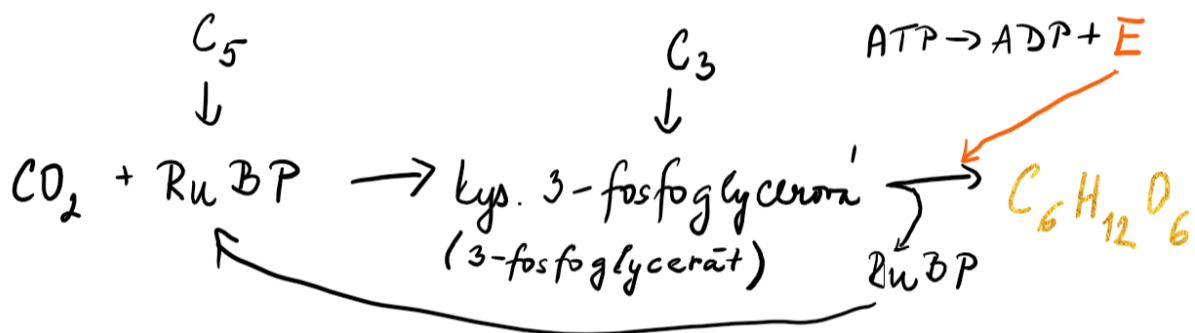
Táto fáza môže prebiehať (aj prebieha) v tme, nie je priamo potrebné svetlo. V tejto fáze dochádza k biosyntéze sacharidov /glukózy/ z  $CO_2$ . Na redukciu  $CO_2$  sa využívajú produkty vzniknuté v primárnych dejoch: NADPH ako redukovač a ATP ako zdroj energie.

Proces zabudovania oxidu uhličitého od jeho naviazania na špecifický akceptor (karboxylácie), až do vzniku organickej látky - glukózy sa nazýva **Calvinov cyklus**.

Špecifickým akceptorom  $CO_2$  je **ribulóza-1,5-bisfosfát (RuBP)**.

Karboxylácia\* je zložitá reakcia, ktorá prebieha cez **C<sub>3</sub>** (trojuhlíkaté) **medziprodukty** (napr. kyselina 3-fosfoglycerová, glyceradehyd-3-fosfát), z ktorých sa postupne vytvára energeticky bohatá C<sub>6</sub> zlúčenina. Energia chemických väzieb tohto cukru má pôvod v svetelnej energii absorbovanej v primárnych dejoch (svetelnej fáze) a viazanej v ATP, NADPH + H<sup>+</sup>.

obr. 3:



Calvinov cyklus prebieha cez trojuhlíkaté ( $\text{C}_3$ ) medziprodukty. Preto rastliny, ktoré na výrobu glukózy využívajú len Calvinov cyklus sa označujú ako  **$\text{C}_3$  rastliny**. U  $\text{C}_3$  rastlín prebieha fotosyntéza pri otvorených prieduchoch a súčasne s fotosyntézou prebieha aj dýchanie – tzv. **fotorespirácia**. Pri fotorespirácii sa až 50% vzniknutých produktov (glukózy) hneď rozkladá a energia sa využíva na metabolické deje.

\*Pozn.: základný **enzým** fotosyntézy **Rubisco** (RuBisCO) = ribulóza-1,5-bisfosfát-karboxyláza/oxygenáza katalyzuje 2 typy reakcií:

1. karboxyláciu - fixáciu  $\text{CO}_2$  v Calvinovom cykle tmavej fázy fotosyntézy (na ribulóza-1,5-bisfosfát sa viaže  $\text{CO}_2$ ).
2. oxidáciu substrátu  $\text{CO}_2$  pre fotosyntézu pri fotorespirácii (na ribulóza-1,5-bisfosfát sa viaže kyslík).

#### **Hatch-Slackov cyklus** ( $\text{C}_4$ cyklus dikarboxylových kyselín)

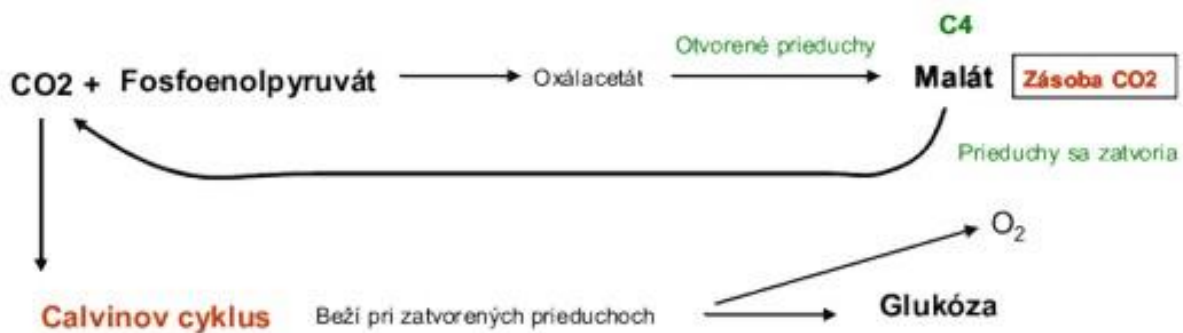
U niektorých rastlín tropického pôvodu (aj cukrová trstina, kukurica, proso ...) prebieha tmavá fáza fotosyntézy trochu inak. Dôvodom je skutočnosť, že počas tmavej fázy u týchto rastlín sú prieduchy zatvorené a teda neprebíha fotorespirácia. Tieto rastliny si preto musia zabezpečiť dostatočné množstvo  $\text{CO}_2$  (zdroj uhlíka) počas doby, keď sú prieduchy otvorené. Toto zabezpečujú Hatch-Slackovým cyklom (H-SC).

Pri Hatch-Slackovom cykle primárnym akceptorom  $\text{CO}_2$  nie je Ribulóza-1,5-bisfosfát ale **fosfoenolpyruvát** (PEP).

Tento cyklus prebieha pri otvorených prieduchoch. Výsledkom H-SC je  $\text{C}_4$  (štvoruhlíkatá) organická zlúčenina **oxalacetát** alebo malát, ktoré slúžia ako zásoba uhlíka.

Po skončení H-SC sa prieduchy zatvárajú a reakcia sa vracia späť, pričom vzniká  $\text{CO}_2$ , ktorý vstupuje do Calvinovho cyklu. Rozdiel je však v tom, že prieduchy ostávajú zatvorené. Keďže neprebíha súčasne dýchanie, teda sa vzniknutá glukóza hneď nespotrebuje, energetický efekt takejto fotosyntézy je vyšší ako pri  $\text{C}_3$  rastlinách. Na druhej strane majú  $\text{C}_4$  rastliny pomerne vysoké nároky na svetlo a teplo, preto v podmienkach mierneho pásma (nižšia intenzita svetla a tepla) nie je táto výhoda plne využitá.

obr. 4:



### Fotosyntéza CAM-rastlín

Hatch-Slackov cyklus je základom fotosyntézy aj u tzv. **CAM rastlín** (Crassulacean\* Acid Metabolism). Patria sem sukulentné rastliny napr. z čeľadí kaktusovité, tučnolistovité, broméliovité. Tieto rastliny reagujú na ekologické podmienky svojho stanovišťa - sucho, krátke horúce dni, chladné noci tak, že prieduchy sa otvárajú v noci a cez deň sú zatvorené. Tým je vodný režim regulovaný bez toho, aby bol obmedzený príjem  $\text{CO}_2$  do dejov fotosyntézy.

\*Pozn.: crassulaceae = čeľaď tučnolisté rastliny

### Faktory ovplyvňujúce fotosyntézu

Pre fotosyntézu sú potrebné určité podmienky, ktoré majú priamy vplyv na tvorbu organickej hmoty - biomasy. Medzi takéto faktory patria:

1. **Oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ )** - je dôležitý pre „výnos“ fotosyntézy. Aj keď niektoré čiastkové deje môžu prebiehať bez prítomnosti  $\text{CO}_2$ , jeho koncentrácia má vplyv na rýchlosť a výnos fotosyntézy. Má to význam pri pestovaní kultúrnych rastlín, napr. v skleníku môžeme umelo zvyšovať množstvo  $\text{CO}_2$ , a tým ovplyvniť výnos z pestovaných rastlín.
2. **Voda** - pri fotolýze je donorom (dodávateľom) elektrónov, protónov a kyslíka. Zároveň vstupuje do rady fotosyntetických procesov a metabolických reakcií, ktoré na fotosyntézu nadväzujú.
3. **Svetlo** - je nositeľom energie, preto sa množstvo svetla považuje za limitujúci faktor fotosyntézy.
4. **Teplota** - patrí medzi ďalšie limitujúce faktory. Intenzita fotosyntézy vo vzťahu k teplote je u rastlín rôzna. Na zemi sú veľmi veľké teplotné rozdiely, ktorým sa rastliny prispôbili. Niektoré termofilné sinice dokážu vykonávať fotosyntézu aj pri teplote  $70\text{--}80^\circ\text{C}$ . Na druhej strane u niektorých lišajníkov prebieha fotosyntéza pri teplotách blízkyh  $0^\circ\text{C}$ . Teplotné optimum rastlín mierneho pásma je  $20\text{--}30^\circ\text{C}$ .